

# 鲁西北中尺度对流复合体环境场特征

柳 林 张国胜

(山东省德州市气象局, 253009)

## 提 要

通过对鲁西北一次典型的中尺度对流复合体(MCC)环境物理量场特征分析,从一个侧面揭示了鲁西北 MCC 生成、发展的环境条件。结果表明: MCC 发生在副高西北侧深厚的高能级、准饱和、潜在不稳定的气层中, 500hPa 东移的中支短波槽是 MCC 的触发系统; 高、低空急流和低层辐合流场对 MCC 的生成和发展具有重要的作用。

关键词: MCC 环境场特征 辐合场

## 1 概述

1998年7月13日夜间到14日上午,受生成于冀东北和渤海西部的MCC影响,鲁西北先后出现了大范围的大暴雨天气。德州、平原、宁津、乐陵、庆云、陵县6个站降水量超过100mm,其中平原最大,为236.6mm。德州14日4~5时1小时降水量69.7mm,平原5时34分至9时18分3个多小时内降水达225.1mm。这次大暴雨无论在范围和强度上都是鲁西北近20年来所罕见的。暴雨造成大面积农田内涝、房屋倒塌,冲毁桥涵2400多座,直接经济损失1亿6千多万元。本文对这次典型的MCC进行分析研究,试图探讨有利于鲁西北MCC生成、发展的环境条件,为暴雨预报提供依据。

## 2 卫星云图分析

图1是GMS-5红外云图,记录了MCC从生成、发展、成熟到减弱的全过程。从图1a可见,13日16时25分,在渤海西部和冀东北就已生成一个中- $\alpha$ 尺度的对流云团,其西半部边界整齐,反映出对流发展旺盛。东部有发散的卷云羽,  $-62^{\circ}\text{C}$ 冷云区的面积已达5.7万 $\text{km}^2$ ,云顶温度已降到 $-70^{\circ}\text{C}$ ,这就是MCC主体的雏型。同时副高的外围,在河南的中部、山西的中南部及河北中部分别散布着多个中- $\beta$ 尺度的对流云团,一边发展,一边沿高空引导气流向偏北、或偏东方向缓

慢移动。20时33分(图1b),原在河北中部东西向的中- $\beta$ 尺度对流云团迅速发展加强,据19时10分的雷达探测,与之对应有一条东西向的带状回波,云顶高达14.3km,并逐渐向偏东方向移动与MCC合并。促使MCC明显西进,高空卷云罩面积进一步扩大,  $-62^{\circ}\text{C}$ 冷云区的面积增加到6.1万 $\text{km}^2$ ,云顶最低温度也降到 $-73^{\circ}\text{C}$ ,云体的南部边缘已开始影响鲁北。14日0时至2时32分(图1c、d)云团合并完成,同时原散布在副高外围的多个中- $\beta$ 尺度对流云团,入夜后相继开始减弱。这时的MCC已进入标准的胞状期,卷云罩呈光滑的椭圆柱体,偏心率为0.75,  $-32^{\circ}\text{C}$ 和 $-62^{\circ}\text{C}$ 的冷云区面积分别达19.7万 $\text{km}^2$ 、7.6万 $\text{km}^2$ ,云体覆盖了整个渤海西部、冀东南、鲁北和山东半岛北部。而后一直到14日7时30分MCC强度少变(图略),并逐渐平行南移,上冲云顶始终在鲁西北,云顶最低温度达 $-83^{\circ}\text{C}$ 。据雷达探测,13日22时起到14日9时止,降水云团也一直在鲁西北活动。因此,从13日夜间到14日上午鲁西北相继出现了大范围的大暴雨天气。14日上午MCC卷云罩已覆盖了山东大部,10时30分后开始减弱,云顶温度逐渐升高,云体分裂,并向偏东方向移动。由于环境场条件有利,MCC从生成到减弱持续了17个多小时。

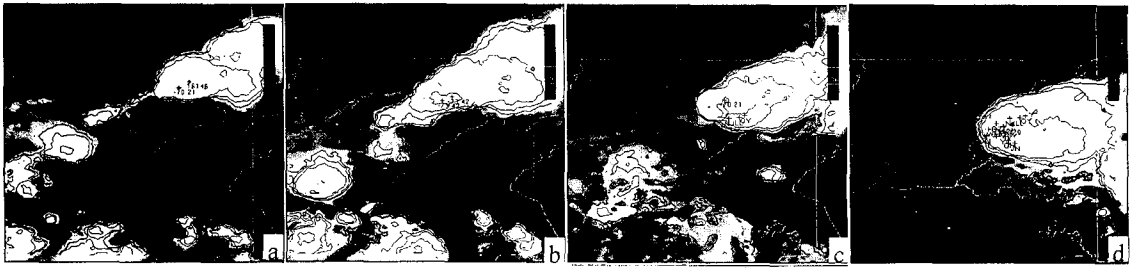


图 1 1998 年 7 月 13~14 日 MCC 发展演变过程的 GMS-5 红外云图  
a. 13 日 16 时 25 分 b. 20 时 30 分 c. 14 日 0 时 d. 2 时 32 分

### 3 有利于 MCC 生成、发展的环流特征

#### 3.1 500hPa 短波槽的触发作用

这次 MCC 发生在 500hPa 东移的中支短波槽前和副高西北侧的西南暖湿气流内, 13 日 08~20 时 500hPa 副高势力较强, 位置偏北, 脊线在 30°N 附近, 5920gpm 的高压中心控制我国的东部沿海。副高与西风带高压合并而形成了南北向的高压脊, 其脊线在 120°E。588 线向北伸到大连、济南、郑州一线, 华北东部均处在副高西侧的西南暖湿气流内。亚洲中部为一宽广的低槽, 从 500hPa 这个大低槽内分裂出来的短波槽 13 日 08 时移到河套附近。由于受东部高压脊的阻挡, 各层均在锡林浩特附近形成一中尺度的低涡, 同时低槽东移速度减慢, 逐渐呈东北~西南向, 20 时当 500hPa 低槽南移到北京、太原到汉中一线时, 与之配合的 700、850hPa 低槽还分别停滞在山西高原和内蒙古到河套北部, 表现为明显的前倾槽。正是 500hPa 上这股从对流层中部入侵的弱冷空气叠加在副高西侧的暖湿气流上面, 加剧了层结的不稳定, 促使强对流的发展, 从而触发了 MCC 的生成。

#### 3.2 高、低空急流的作用

通过对 13 日 20 时 200hPa 图上风场的分析看到 (图略), 从四川北部经山西高原伸向辽宁西部有一支高空西南急流, 急流轴上  $32\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速中心分别在延安和北京附近。同时在低层 850hPa 从郑州经济南到锦州有一支次天气尺度的低空西南急流,  $14\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $16\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速中心分别在济南和锦州附近。高低空急流的风速中心相距不

过 3 个纬距, MCC 就发生在这个高空急流的右下侧辐散区和低空西南急流左前侧辐合区的重叠处。这里具有高能、潜在不稳定、低层辐合及高空辐散, 能充分满足 MCC 所需要的深厚垂直环流发展的条件。同时低空急流中心的左前侧有利于气旋性涡度的增加和流场的辐合, 又是不稳定能量释放的触发机制, 这可能是促使 MCC 发生的基本动力之一。

分析证明: 副热带急流与西风带急流交汇的地区, 是有利于 MCC 发生与发展的区域。13 日傍晚到前半夜正是 MCC 迅速发展加强的阶段, 从 13 日 20 时 500hPa 图上可以分析出 (图略), 西风槽后的偏西风急流与副高西侧的副热带西南急流在冀东、渤海西部交汇, 这里是角动量和能量南北交换最强盛的地方, 因而中纬度 MCC 发生、发展也多出现在这种形势下。

#### 3.3 低层有利的辐合流场

MCC 是产生暴雨的主要天气系统, MCC 的生成、发展和维持必须有足够大的上升运动, 因而需要大气低层必须具有与之相适应的中尺度辐合区。13 日 20 时在行星边界层, 鲁西北附近形成一个中尺度低压, 在流场上它是一个强的辐合中心 (图略)。中低压的南侧从河南的南阳经郑州到济南有一支中尺度的超低空急流,  $14\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的急流中心在济南附近。另外, 在东部沿海青岛、大连到锦州还有一支尺度较宽的急流带。超低空偏南急流的存在一方面为暴雨区输送丰富的水汽和能量, 同时急流的左侧可产生较强的气旋性涡度, 在急流中心的前方较强的辐合

作用促使中尺度低压的形成。因此,低层辐合的流场、中尺度低压及水汽抬升凝结潜热的释放,对MCC的发展和暴雨的产生起到了重要作用。分析研究也证实<sup>[1]</sup>:边界层中超低空急流和超低空涡旋的形成是造成暴雨的重要条件。

### 3.4 地面气压场与流场特征

13日14时地面图上,华北东部处在高压后部,等压线为南北走向,并在渤海西部、冀东北附近等压线呈明显的气旋性弯曲,在保定、天津、乐亭可分析出一条东西向的切变,切变的北侧伴有大片阵性降水。在地面流场上,天津、乐亭间是一弱的辐合中心。可

见13日下午到傍晚MCC就生成在这支中尺度切变上的辐合区内。20时地面图上,华北形成一个倒槽,与低层冷空气配合的弱冷锋在北京、邢台、安阳到西安一线,这时原在天津、乐亭间的地面辐合中心已移到冀东南至鲁西北附近,同时在鲁中还有一弱的辐合中心(图2a)。由于弱冷空气的作用,低层气流辐合加强,从地面到边界层形成一个垂直发展的辐合中心。14日02时地面图上,南北两个辐合中心合并,中心移到鲁西北,强度进一步发展(图2b),表明了弱冷空气的抬升和地面的辐合流场对MCC的发展起到了重要作用。

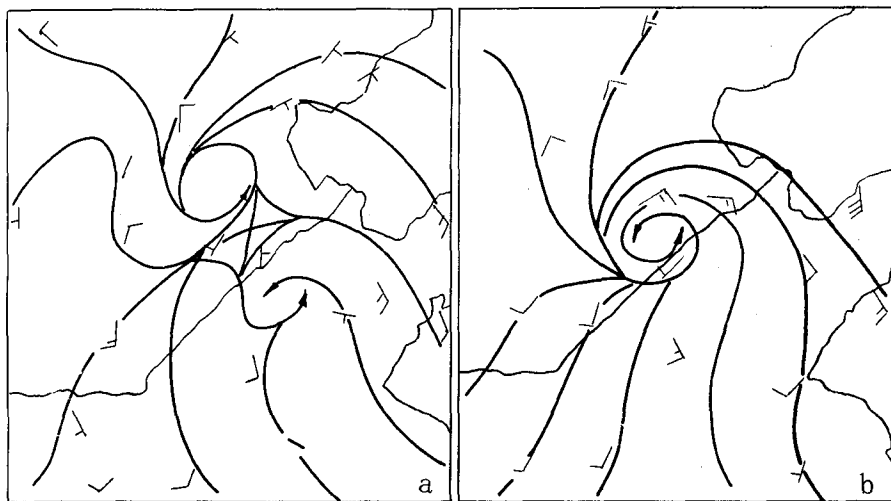


图2 1998年7月13日20时(a)和14日02时(b)地面流场分析

## 4 环境物理量场特征

### 4.1 高能级深厚湿层

在分析13日20时850hPa能量场中发现(图略),从河套南部伸向华北东南部有一条东北~西南向的高能舌,90℃的高能等值线一直伸到鲁西北,高能舌北侧等能线密集,为能量锋区。高能轴线的右前方是MCC活动和未来暴雨的落区,这里具有高能级、准饱和及较强的不稳定层结,为MCC的发展提供足够能量和辐合上升运动的环境。图3是通过鲁西北的南北向能量空间剖面图,能清楚地反映出MCC发展和产生暴雨的能量

垂直分布特征。在邢台附近是一个高能中心,低层既有与低空急流相联系的向上隆起的高能舌,高层又有和高空急流相联系下垂的高能舌。锋区等能线垂直分布形成了铅直能量锋,同时还有一支从对流层低层伸向高空的能量管。能量管内具有深厚的垂直运动的湿中性结构( $T_e/p \approx 0$ ),在这种状态下,低层辐合上升运动到对流层中部便会形成较强的上升气流。有利于低空辐合、高层辐散垂直环流的加强,能够满足MCC在对流层中部具有平均中尺度上升气流、准饱和及暖心结构的环境场<sup>[2]</sup>。

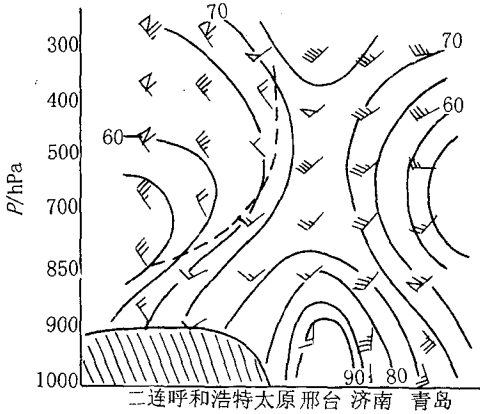


图3 1998年7月13日20时T<sub>v</sub>空间剖面图

#### 4.2 潜在不稳定能量

计算表明,潜在不稳定高值中心在河套附近,与能量场分布特征相似,鲁西北也是处在潜在不稳定中心轴线的右下方。同样,沙氏指数  $SI = -3.5$  的中心位于河北南部和鲁西北附近,清楚地反映了MCC处在不稳定中心的下风方(图略)。进一步分析邢台附近的能量垂直廓线,表明MCC在发展阶段正处于准饱和且潜在不稳定深厚的高能气层之中,非常有利于强对流的发展(图略)。邢台低层能级达  $91^{\circ}\text{C}$ ,平均能级为  $80^{\circ}\text{C}$ ,自由对流高度在  $850\text{hPa}$  附近,能量平衡高度在  $200\text{hPa}$  以上,潜在不稳定能量面积很大。潜在不稳定指数 ( $T_{\sigma_{925}} - T_{\sigma_{500}}^*$ ) 为  $14.2^{\circ}\text{C}$ ,表现出高能级和较强的潜在不稳定。近年来经常用对流有效位能(CAPE)来表示自由对流高度以上,上升气块从正浮力做功而获得的能量<sup>[3]</sup>。这部分能量对大气对流有着积极的作用,并可转化为大气动能,故称为对流有效位能,其表达式为:

$$CAPE = g \int_{Z_f}^{Z_e} \frac{1}{T_{ue}} (T_{va} - T_{ve}) dz \quad (1)$$

式中  $T_v$  表示虚温,  $Z_f$  表示自由对流高度,  $Z_e$  为平衡高度,下标  $a, e$  分别表示与气块、环境有关的物理量。事实上,CAPE比传统意义上的对流不稳定能量更能恰当地表示对流发展的强度。按照理想假定,气团若在自由对

流高度的垂直速度为零,在自由对流高度之上由于环境的正浮力而产生一定加速度,则其到达平衡高度时,最大上升速度为:

$$W_{\max} = (2 \times CAPE)^{1/2} \quad (2)$$

通过计算以济南为中心,东西长为  $2500\text{km}$ ,南北宽为  $850\text{km}$ ,  $50 \times 50\text{km}$  网格点上,  $850 \sim 150\text{hPa}$  的CAPE值(图4),  $2067\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$  的中心在河北南部到鲁西一带,鲁西北正处在其下风方。利用式(2)可以计算出当时MCC云团上部最大上升速度是相当大的。同时通过计算强天气威胁指标(SWEAT)<sup>[4]</sup>,其最大值正位于鲁西北上空(图略),预示着鲁西北出现强天气的可能性最大。

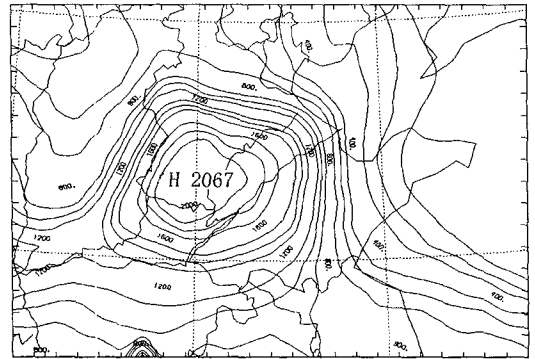


图4 1998年7月13日20时对流有效位能(单位:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

#### 4.3 水汽的输送与辐合

低空偏南急流是水汽和能量的输送带,最大水汽能量常与低空急流轴相一致。同时由于低空急流本身就具有较大的动能,常因在水平方向上分布的不均匀和风速在水平或垂直方向的切变而引发强烈的不稳定和垂直运动的发展。13日08~20时在MCC生成、发展阶段,  $850\text{hPa}$  在副高西侧都存在一支低空西南急流,随低槽东移急流轴也逐渐东移,20时急流轴移到济南上空。同时边界层也形成了一支超低空西南风急流,  $14\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速中心在济南附近,丰富的水汽不断从我国西南向华北南部输送。据对20时  $850\text{hPa}$  水汽通量散度的计算看出,在冀东有一个  $-57.3\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  的强中心(图5),水汽辐合较强的区域与MCC活动范围

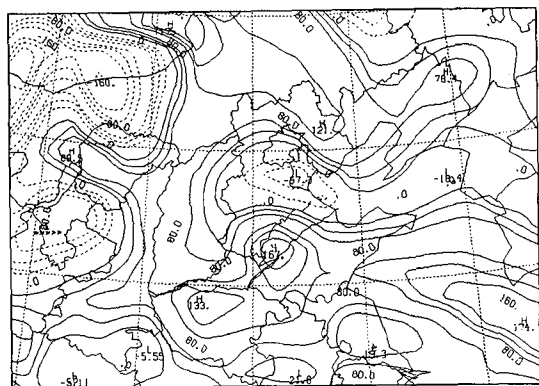


图5 1998年7月13日20时850hPa水汽通量散度

(单位:  $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$ )

相一致。水汽的辐合,使上升气流加强和水汽与能量在垂直方向上交换,使对流层925~250hPa的平均 $T - T_d$ 达 $4.6^{\circ}C$ ,形成了深厚的高能级、潜在不稳定、准饱和和湿层。为MCC的发展提供了足够的水汽和能量供给。

### 5 小结

①通过以上分析表明,盛夏鲁西北MCC

多发生在副高西北侧深厚的高能级、准饱和、潜在不稳定的气层内;500hPa前倾短波槽是MCC生成的触发系统。

②高空急流中心的右下侧与低空急流中心左前方的重叠处,及500hPa上西风带偏西急流与副热带西南急流交汇处有利于MCC的发生。

③地面及行星边界层形成的中尺度低压和辐合流场,有利于垂直运动的发展和水汽及能量的交换,为MCC的发展起到重要的作用。

④对流有效位能(CAPE)、强天气威胁指标(SWEAT)、水汽通量散度及沙氏指数(SI)等物理量及参数,对MCC的发展和暴雨落区具有较好的指示性。

### 参考文献

- 1 雷雨顺. 略分析行星边界层和暴雨. 宁夏气象, 1979 (增刊).
- 2 陈乾. 关于中尺度对流复合体的若干问题. 气象科技, 1984; 48.
- 3 李耀东等. 埃玛图微机制作及对流有效位能的计算. 气象, 1998, 24 (5): 24~27.
- 4 寿绍文等. 中尺度对流系统及其预报. 北京: 气象出版社, 1993: 138.

## Several Characteristics of the Environment Field of Mesoscale Convective Complexes over the Northwest of Shandong Province

Liu Lin Zhang Guosheng

(Dezhou Meteorological Office, Shandong Province, 253009)

### Abstract

By an analysis of some characteristics of the environment physical field of a typical MCC, an important aspect of the environment conditions of the emergence and development of the MCC over the northwest of Shandong Province was revealed. The results show that MCC appears in the air layers of deep and thick high-energy-scale, quasi-saturation and latent instability in the northwestern side of the subtropical high, and the middle-latitude short-wave trough of 500hPa moving eastward is the initiation system of MCC. The convergence stream field of the upper-level jet stream and low-level jet stream play an important part in the emergence and development of the MCC.

**Key Words:** MCC environment field convergence stream field